

UDK: 551.573
Originalni naučni rad

UTICAJ NAGIBA I ORIJENTACIJE POVRŠINE NA PRORAČUN REFERENTNE EVAPOTRANSPIRACIJE PRIMENOM PENMAN-MONTEITH METODE

Miloš STANIĆ, Željko VASILIC i Dušan PRODANOVIĆ

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

REZIME

Evapotranspiracija je značajna komponenta hidrološkog bilansa koja se računa na osnovu referentne evapotranspiracije (ET_0). Poslednjih pedeset godina razvijen je veliki broj empirijskih modela za proračun ET_0 . Organizacija Ujedinjenih nacija za hranu i poljoprivredu (eng. *United Nations Food And Agriculture Organisation* - FAO) u maju 1990 preporučila je upotrebu Penman-Monteith metode za proračun ET_0 . Ova metoda je postala široko prihvaćena u svetu i koristi se kao standard. Metoda definiše ET_0 kao potencijalno isparavanje sa horizontalne referentne površine. Orijentacija i nagib površine međutim imaju uticaj na količinu raspoložive sunčeve energije a samim tim i na vrednost ET_0 . Količina raspoložive sunčeve energije koja učestvuje u procesu evapotranspiracije naziva se neto radijacija i zavisi, između ostalog, od radijacije koja stiže na granicu atmosfere i transmisivnosti atmosfere. U radu je razvijen metod za proračun radijacije na granici atmosfere u zavisnosti od pada i orijentacije površine kao i postupak za proračun neto radijacije na površinu pod nagibom uzimajući u obzir sve tri komponente radijacije (direktnu, difuzionu i komponentu refleksije). Testiranje modela sprovedeno je koristeći podatke sa meteorološke stanice Smederevska Palanka. Rezultati modela pokazuju da se sa povećanjem nagiba smanjuje referentna ET_0 za severno orijentisane površine, a povećava za južno orijentisane.

Ključne reči: Referentna evapotranspiracija, Penman-Monteith, ET_0

1 UVOD

Referentna evapotranspiracija ET_0 se definiše kao potencijalno isparavanje sa referentne površine, pri čemu se kao referentna površina usvaja gusta trava visine 12 cm, čiji koeficijent refleksije (albedo) iznosi

0,23 i koja ima konstantan otpor isparavanju od 70 s m^{-1} (Allen et al., 1998). Da bi isparavanje bilo jednako potencijalnom, smatra se da su uslovi vlažnosti zemljišta takvi da ne predstavljaju ograničenje za maksimalno isparavanje. Ovo je zvanična definicija pojma referentna evapotranspiracija koju je definisala ekspertska grupa formirana pod okriljem FAO organizacije. Ovakvom definicijom referentna evapotranspiracija postaje klimatska veličina, što daje mogućnost da se metode za proračun ove veličine unificiraju i naprave uporedivim (Webb, 2010). Iako se u ovoj definiciji ne spominje, podrazumeva se da se ovako definisana ET_0 , odnosi na horizontalne površine. Međutim orijentacija i nagib površine, svakako imaju uticaj na količinu raspoložive sunčeve energije, pa samim tim i na vrednost ET_0 .

Količina raspoložive energije koja učestvuje u procesu evapotranspiracije naziva se neto radijacija i predstavlja razliku neto kratkotalasne i neto dugotalasne radijacije. Neto kratkotalasna radijacija predstavlja razliku dolazne i odlazne kratkotalasne radijacije. Dolazna kratkotalasna radijacija sastoji se od tri komponente (direktna, difuzna i refleksiona) i zavisi od radijacije na granici atmosfere, transmisivnosti atmosfere i orijentacije i pada površine. Različiti autori bavili su se problematikom određivanja ovih komponenti. Hetrick et al. (1993) i Kumar et al. (1997) su se bavili modeliranjem solarne radijacije u GIS okruženju. Allen i Trezza (2006) su razvili model za određivanje radijacije na granici atmosfere u toku 24 časa. Međutim nije bilo radova koji bi povezali uticaj ovako sračunate solarne radijacije na vrednost ET_0 .

U radu će se prikazati osnovne jednačine potrebne za proračun ET_0 kako bi se metoda Penman-Monteith malo približila praksi (Bonacci, 2005) i uvela u standardnu inženjersku upotrebu (Avakumović et al., 2005). U proračunu neto radijacije Penman-Monteith metoda podrazumeva da radijacija na granici atmosfere

u toku 24 časa zavisi isključivo od geografske širine i rednog broja dana u godini kao i da se u toku dana javlja samo jedan kontinualan period osunčanosti. Prikazaće se model za proračun radijacije na granici atmosfere u toku 24 časa koji u obzir uzima orijentaciju i pad površine kao i dodatne granice integracije ukoliko postoje dva sunčana perioda u toku dana što se može javiti na strmim terenima.

Proračun neto radijacije se sprovodi iz nekoliko koraka. Najpre će se sračunati direktna i difuziona komponenta kratkotrasne radijacije pod pretpostavkom horizontalne površine, a zatim će se preko radijacije na granici atmosfere u proračun uvesti nagib i orijentacija površine. Sračunaće se sve tri komponente kratkotrasne radijacije i njihov zbir predstavlja dolaznu kratkotrasnu radijaciju na površinu određenog nagiba i orijentacije. Odlazna kratkotrasna i neto dugotalasna radijacija se računaju prema standardnim jednačinama Penman-Monteith metode. Neto radijacija će predstavljati razliku neto kratkotrasne i neto dugotalasne radijacije.

Referentna evapotranspiracija je dalje računata prema osnovnoj jednačini Penman-Monteith metode (Avakumović, 1994). Model je testiran koristeći podatke sa meteorološke stanice Smederevska Palanka. Ispitivane su površine nagiba 20°, 30° i 45° i različitih orijentacija.

2 PENMAN-MONTEITH METODA

Originalna Penman-Monteith jednačina glasi (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{\frac{1}{\lambda} \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{187250}{T_{sr} + 273} \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (1)$$

gde su:

- ET_0 – referentna evapotranspiracija (mm/dan)
- λ – latentna toplota isparavanja (MJ kg^{-1})
- R_n – neto radijacija ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$)
- G – razmena toplote sa zemljom ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$)
- $(e_s - e_a)$ – deficit napona zasićene vodene pare (kPa)
- Δ – nagib krive zasićene vodene pare ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

- γ – psihrometrijska konstanta ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- T_{sr} – srednja vrednost temperature;
 $T_{sr} = (T_{\min} + T_{\max}) / 2 \text{ (} ^\circ\text{C)}$
- r_a, r_s – otpori isparavanju: aerodinamički i površine (s m^{-1}).

Upotrebom prethodne jednačine može se direktno odrediti potencijalna evapotranspiracija za bilo koju površinu, pri čemu bi u svakom konkretnom slučaju bilo potrebno definisati otpore isparavanju, r_s i r_a , koji su pri tom promenljivi u vremenu i zavise od faze razvoja vegetacije. Ukoliko se jednačina (1), kao što je uobičajeno, primenjuje za referentnu površinu¹, usvaja se konstantna vrednost parametra r_s od 70 s m^{-1} i aerodinamički otpor isparavanju se računa u zavisnosti od brzine vetra na visini od 2 m od površine terena (u_2): $r_a = 208/u_2 \text{ (s m}^{-1}\text{)}$.

Sve veličine koje se koriste za proračun su merene veličine ili se mogu odrediti iz meteoroloških podataka (temperatura, brzina vetra, vlažnost, insolacija), pa ET_0 predstavlja klimatsku veličinu.

2.1 Ulazni podaci za proračun

Vlažnost vazduha

Napon vodene pare (e_a) je meteorološka veličina koja se meri u bolje opremljenim meteorološkim stanicama i direktna je mera relativne vlažnosti vazduha. Relativna vlažnost vazduha je odnos stvarnog napona vodene pare i napona zasićene vodene pare (e_s).

Napon zasićene vodene pare, zavisi od temperature vazduha i može se sračunati kao:

$$e_s(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \quad (2)$$

Usled nelinearnosti funkcije zavisnosti napona zasićene vodene pare od temperature, napon zasićene vodene pare koji figuriše u FAO Penman-Monteith jednačini (1) se računa kao prosečna vrednost:

$$e_s = \frac{e_s(T_{\max}) + e_s(T_{\min})}{2} \quad (3)$$

¹ Trava uniformne visine 12 cm, sa koeficijentom refleksije (albedom) $\alpha = 0.23$. Otpor površine je $r_s = 70 \text{ s m}^{-1}$. Aerodinamički otpor se može sračunati kao $r_a = \frac{208}{u_2}$ (Allen, et al., 1998)

pri čemu su T_{max} i T_{min} , merena maksimalna i minimalna temperatura u toku dana. Sa porastom temperature raste i nagib krive zasićene vodene pare:

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} = 4098 \frac{e_s(T_{sr})}{(T_{sr} + 237,3)^2} \quad (4)$$

Ukoliko je raspoloživ podatak o relativnoj vlažnosti vazduha (RH), stvarni napon vodene pare (e_a) može se odrediti na sledeći način:

$$e_a = \frac{e_s(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e_s(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}}{2} \quad (5)$$

Razlika između zasićenog (e_s) i stvarnog (e_a) napona vodene pare ($e_s - e_a$) predstavlja deficit napona vodene pare.

Psihometrijska konstanta

Psihometrijska konstanta nije konstanta u pravom smislu reči jer zavisi od vlažnosti vazduha, pritiska i temperature. Međutim njena vrednost je bliska konstanti za uobičajen raspon vrednosti ovih parametara (Webb, 2010). Računa se kao:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0,665 \times 10^{-3} P \quad (6)$$

gde su:

- c_p - specifična toplota na konstantom pritisku ($= 1,013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- P - atmosferski pritisak koji se može sračunati iz podatka o nadmorskoj visini (kPa)
- ϵ - odnos molekularne težine vodene pare i suvog vazduha (0,622)
- λ - latentna toplota isparavanja ($= 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ pri 20°C)

Latentna toplota isparavanja (λ) predstavlja količinu energije potrebnu da se 1 kg vode prevede u 1 kg vodene pare, pod pretpostavkom da su pritisak i temperatura konstantni. Vrednost λ , koja se računa prema jednačini (7), se smanjuje sa povećanjem temperature okoline, ali veoma malo varira u odnosu na vrednost $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ koja se odnosi na temperaturu od 20°C .

$$\lambda = 2,501 - 0,002361 T_{sr} \quad (7)$$

Vrednost atmosferskog pritiska zavisi od nadmorske visine (z) i računa se prema jednačini:

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (8)$$

Brzina vetra

Brzina vetra je najmanja na površini Zemlje usled trenja. U FAO Penman-Monteith jednačini (1) koristi se podatak o brzini vetra na visini od 2 metra iznad površine da bi se sračunao aerodinamički otpor. Uobičajeno je da se brzina vetra meri na visini od 10 metara pa ukoliko se pretpostavi logaritamski zakon rasporeda brzine, može se sračunati brzina vetra na visini od 2 metra:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 \times z - 5,42)} \quad (9)$$

gde je z visina originalnog merenja brzine vetra u_z (10 metara).

Neto radijacija

U FAO Penman-Monteith jednačini (1) neto solarna radijacija se označava sa R_n . Uzimajući u obzir da se radi o horizontalnoj površini u daljem tekstu će se označavati sa R_n^{hor} . Neto solarna radijacija koja stiže na horizontalnu površinu u toku 24h (R_n^{hor}) predstavlja razliku neto kratkotalasne radijacije (R_{ns}^{hor}) i neto dugotalasne radijacije (R_{nl}) (Slika 1).

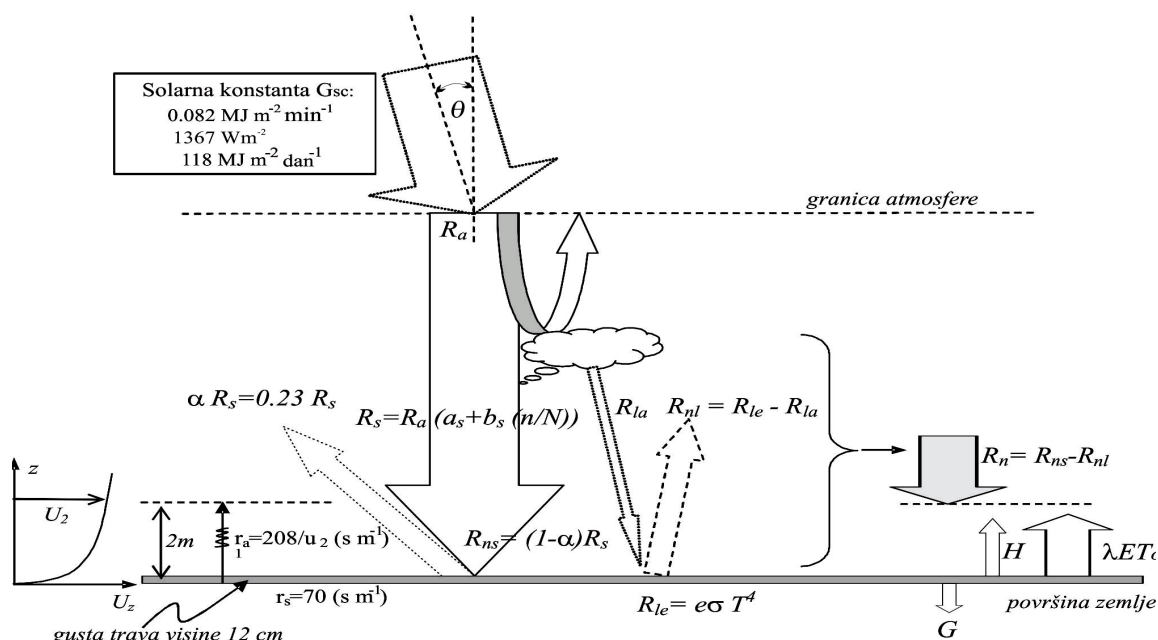
$$R_n^{hor} = R_{ns}^{hor} - R_{nl} \quad (10)$$

Neto radijacija na površini je tokom dana pozitivna a tokom noći najčešće negativna. Kako se proračun odnosi na sumarnu vrednost dnevne radijacije, R_n^{hor} je uvek veće od nule.

Dolazna neto kratkotalasna radijacija se računa kao:

$$R_{ns}^{hor} = (1 - \alpha) R_{s24}^{hor} \quad (11)$$

gde je α koeficijent refleksije površine (albedo) i jednak je 0,23 i R_{s24}^{hor} kratkotalasna - solarna radijacija (direktna i difuzna) koja stiže na površinu u toku 24 časa. Deo radijacije koja stiže na granicu atmosfere (R_{a24}^{hor}) se potroši na zagrevanje atmosfere, deo se reflektuje od oblaka ili čestica prašine i preostala radijacija predstavlja kratkotalasnu solarnu radijaciju:



Slika 1. Shematski prikaz energetskog bilansa

$$R_{s24}^{hor} = R_{a24}^{hor} \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) \quad (12)$$

gde su $a_s=0,25$ i $b_s=0,5$ bezdimenzionalne empirijske konstante, a član n/N mera oblačnosti i predstavlja odnos stvarne (merene) i potencijalne insolacije. Tipične vrednosti solarne radijacije se kreću između 1 i $35 \text{ MJm}^{-2}\text{dan}^{-1}$. Najviše vrednosti su tokom leta pri vedrom vremenu a najniže zimi pri oblačnom (Webb, 2010).

Radijacija na granici atmosfere (R_{a24}^{hor}) se može proceniti koristeći solarnu konstantu (G_{sc}), solarnu deklinaciju (δ) i doba godine:

$$R_{a24}^{hor} = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r \times [\omega_s \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \sin(\omega_s)] \quad (13)$$

gde su:

- G_{sc} – solarna konstanta ($=0.082 \text{ MJm}^{-2} \text{ min}^{-1}$),
- d_r – inverzno relativno rastojanje Zemlja-Sunce,
- ω_s – časovni ugao zalaska sunca (rad),
- ϕ – geografska širina (rad),
- δ – solarna deklinacija, koja predstavlja ugao između zraka i ekvatora. Menja se sezonski i kreće u granicama $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$.

U prethodnoj jednačini, svi uglovi se unose u radijanima a rezultat je u $\text{MJm}^{-2}\text{dan}^{-1}$.

Za proračun radijacije na granici atmosfere, potrebno je prethodno sračunati sledeće veličine:

- Inverzno relativno rastojanje Zemlja-Sunce može se sračunati prema jednačini:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (14)$$

gde je J redni broj dana u godini ($1 - 365$),

- Časovni ugao zalaska Sunca za horizontalnu površinu računa se prema jednačini:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi) \tan(\delta)] \quad (15)$$

- Solarna deklinacija računa se prema jednačini:

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (16)$$

Potencijalna insolacija (trajanje sunčevog sjaja), koja se koristi za proračun globalne kratkotalsne solarne radijacije (12), izražava se u časovima (h/dan) i za slučaj horizontalne površine računa se kao:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (17)$$

Neto dugotalasna radijacija (R_{nl}) predstavlja razliku između dolazne (R_{la}) i odlazne (R_{le}) dugotalasne radijacije. Imajući u vidu da je, integraljeno na nivou dana, ukupna dnevna odlazna dugotalasna radijacija uvek veća od dolazne, neto dugotalasna radijacija predstavlja gubitak u energetskom bilansu radijacije (Slika 1). Prema Štefan-Bolcmanovom zakonu količina energije izračena sa jedinice površine idealnog crnog tela u jedinici vremena proporcionalna je četvrtom stepenu apsolutne temperature idealnog crnog tela:

$$R_l = e\sigma T^4 \quad (18)$$

gde je T – temperatura ($^{\circ}\text{K}$), e – koeficijent emisivnosti i σ – Stefan-Boltzmann-ova konstanta ($4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1} \text{ K}^{-4}$).

Deo izračene energije se absorbuje u atmosferi a deo izrači u suprotnom smeru. Vlažnost vazduha, oblačnost kao i koncentracije čestica ugljen dioksida i prašine utiču na ovu količinu izračene energije i ulaze u proračun neto dugotalasne radijacije. Neto dugotalasna radijacija se računa prema sledećoj jednačini:

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min_K}^4 + T_{\max_K}^4}{2} \right) \times \left(0,34 - 0,14\sqrt{e_a} \right) \times \left(1,35 \frac{R_{s24}^{hor}}{R_{s024}^{hor}} - 0,35 \right) \quad (19)$$

gde $R_{s24}^{hor} / R_{s024}^{hor}$ predstavlja odnos računate (ili merene) kratkotalasne radijacije i kratkotalasne radijacije pri vedrom nebu ($n/N=1$). Za slučaj referentne površine, koristeći jednačinu (12), neto dugotalasna radijacija se može izraziti sledećom jednačinom u kojoj figuriše relativna insolacija:

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min_K}^4 + T_{\max_K}^4}{2} \right) \times \left(0,34 - 0,14\sqrt{e_a} \right) \times \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) \quad (20)$$

Razmena toplote sa zemljom

U jednačini (1) član G predstavlja razmenu toplote sa zemljom. To je deo energije koji se utroši na zagrevanje zemljišta. Član je pozitivan kada se zemljište zagreva a negativan kada se hladi. Za proračune koji se odnose na period od jednog do deset dana ovaj član se može zanemariti jer se smatra da će

toplota zemljišta biti približno ista na početku i kraju razmatranog perioda tj. G je zanemarljivo u odnosu na neto radijaciju R_n^{hor} (Webb, 2010). Generalno, za proračun ovog člana energetskog bilansa uvodi se pretpostavka da promena temperature zemljišta prati promenu temperature vazduha i primenjuje se uprošćena metoda:

$$G = c_s \frac{\Delta z \Delta T}{\Delta t} \quad (21)$$

gde su:

- c_s – toplotni kapacitet zemljišta ($\text{MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
- ΔT – promena temperature vazduha u periodu Δt ($^{\circ}\text{C}$)
- Δt – diskretizacija po vremenu (dan)
- Δz – efektivna dubina zemljišta koja učestvuje u razmeni toplote (m).

Efektivna dubina zemljišta (Δz) zavisi od diskretizacije po vremenu. Za $\Delta t = 1$ ili 10 dana dubina je 0,10 do 0,20 m dok je za diskretizaciju od mesec dana vrednost 1 do 2 m. Za period od 30 dana uzima se konstantna vrednost toplotnog kapaciteta zemljišta $c_s = 2,1 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ pa se jednačina (21) svodi na:

$$G_{\Delta t=30} = 0,14(T_i - T_{i-1}). \quad (22)$$

3 UTICAJ NAGIBA I ORIJENTACIJE POVRŠINE

Prilikom proračuna referentne evapotranspiracije (ET_0) primenom Penman-Monteith metode koristi se podatak o neto radijaciji pod pretpostavkom horizontalne površine (R_n^{hor}). Globalno, količina solarne radijacije na nekoj površini kontrolisana je geometrijom Zemlje, provodljivošću atmosfere i relativnim položajem Sunca. Lokalno, radijacija je dodatno kontrolisana orijentacijom i padom površine. Ako se u obzir uzmu i ovi dodatni parametri rezultati dobijeni za ET_0 se mogu značajno razlikovati.

U metodi Penmann-Monteith-a, za proračun neto solarne radijacije na nekoj površini, koristi se podatak o ukupnoj dnevnoj radijaciji na granici atmosfere za horizontalnu površinu R_{a24}^{hor} , i dodatno se uzima u obzir provodljivost atmosfere i oblačnost (jednačina (12)). Za određenu kombinaciju pada i orijentacije površine može se sračunati radijacija na granici atmosfere u toku 24 časa (R_{a24}) i neto solarna radijacija na površinu pod nagibom (R_n^{incl}) koja se dalje koristi u

proračunu referentne evapotranspiracije (ET_0) shodno jednačini (1).

3.1 Radijacija na granici atmosfere u toku 24 časa (R_{a24})

Radijacija na granici atmosfere u bilo kom trenutku dana (t) je funkcija položaja Sunca (Allen et al., 2006):

$$R_a(t) = G_{sc} d_r \cos(\theta(t)) \quad (23)$$

gde su:

- $R_a(t)$ – radijacija na granici atmosfere (Wm^{-2}),
- G_{sc} – solarna konstanta ($1367 \text{ Wm}^{-2} = 0,082 \text{ MJm}^{-2}\text{min}^{-1}$),
- $\cos(\theta(t))$ – kosinus ugla između normale na površinu i pravca pada zraka i
- d_r – inverzno relativno rastojanje Zemlja-Sunce.

Kompletna jednačina za proračun kosinusa ugla između normale površine i pravca pada zraka na površinu ($\cos(\theta)$) ima sledeći oblik:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(s) \\ & - \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(s) \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(s) \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(s) \cos(\gamma) \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \sin(\gamma) \sin(s) \sin(\omega) \end{aligned} \quad (24)$$

gde su:

s – pad površine ($0 \leq s \leq \frac{\pi}{2}$); za pad se uvek usvaja pozitivna vrednost tj. $s \geq 0$

ϕ – geografska širina,

γ – orijentacija pada

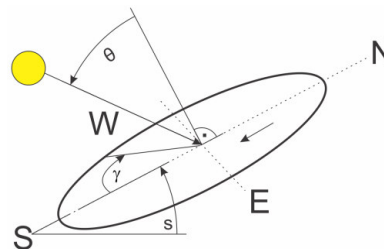
$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{za} & \text{jug (S)} \\ -\frac{\pi}{2} & \text{za} & \text{istok (E)} \\ -\frac{\pi}{2} & \text{za} & \text{zapad (W)} \\ \pm\pi & \text{za} & \text{sever (N)} \end{cases},$$

ω – časovni ugao tj. ugao od lokalnog meridijana:

$\omega = 0$ podne, $\omega < 0$ jutro, $\omega > 0$, večer (Slika 3)

δ – solarna deklinacija tj. ugao između zraka i ekvatora i može se sračunati primenom jednačine (16).

Prikaz osnovnih uglova dat je na slici 2.



Slika 2. Prikaz osnovnih uglova

Jednačina (24) se može integraliti između dva časovna ugla (ω_1 i ω_2) u toku dana:

$$\begin{aligned} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos(\theta) d\omega = & \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(s) (\omega_2 - \omega_1) \\ & - \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(s) \cos(\gamma) (\omega_2 - \omega_1) \\ & + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(s) [\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1)] \\ & + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(s) \cos(\gamma) [\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1)] \\ & - \cos(\delta) \sin(\gamma) \sin(s) [\cos(\omega_2) - \cos(\omega_1)] \end{aligned} \quad (25)$$

Ako se za granice integracije ω_1 i ω_2 usvoje ugao izlaska, odnosno zalaska sunca iz jednačine (23) se može dobiti radijacija na granici atmosfere u toku 24 časa:

$$R_{a24} = \frac{G_{sc}}{2\pi} d_r \int_{\omega_{24}}^{\omega_{24}} \cos(\theta) d\omega \quad (26)$$

Za slučaj horizontalne površine pad je jednak nuli ($s=0$) a orijentacija nije bitna, pa jednačina (24) za proračun $\cos(\theta)$ postaje:

$$\cos(\theta_{hor}) = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \quad (27)$$

Za horizontalnu površinu, uglovi izlaska odnosno zalaska sunca su $\omega_{124} = -\omega_s$ i $\omega_{24} = \omega_s$ gde se ω_s može izraziti iz prethodne jednačine postavljanjem uslova $\cos(\theta_{hor}) = 0$, čime se dobija jednačina (15). Tada se radijacija u toku 24 časa dobija kao:

$$\begin{aligned} R_{a24}^{hor} = & \frac{G_{sc}}{\pi} d_r \times \\ & \times [\sin(\delta) \sin(\phi) \omega_s + \cos(\delta) \cos(\phi) \sin(\omega_s)] \end{aligned} \quad (28)$$

što je ekvivalentno jednačini (13). Razlika je jedino u upotrebi solarne konstante u drugim jedinicama (Wm^{-2} umesto $\text{MJm}^{-2}\text{min}^{-1}$), pa je rezultat prethodne jednačine prosečan energetska fluks u toku dana izražen u Wm^{-2} .

Određivanje granica integracije

Kada površina nije horizontalna, granice integracije se određuju rešavanjem jednačine (24) uz uslov $\cos(\theta) = 0$, odnosno $\theta = 90^\circ$, jer se tada zrak prvi put pojavljuje na površini. Dobija se sledeća jednačina:

$$\cos(\omega) = \frac{a}{b} - \frac{c}{b} \sin(\omega) \quad (29)$$

gde su:

$$\begin{aligned} a &= \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(s) \cos(\gamma) \\ &\quad - \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(s) \\ b &= \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(s) \\ &\quad + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(s) \cos(\gamma) \\ c &= \cos(\delta) \sin(s) \sin(\gamma) \end{aligned} \quad (30)$$

Rešavanjem jednačine (29) po $\sin(\omega)$ dobijaju se mogući kandidati za uglove izlaska i zalaska sunca $\omega_{1_{24}}$ i $\omega_{2_{24}}$:

$$\begin{aligned} \sin(\omega_{1_{24}}) &= \frac{ac - b\sqrt{b^2 + c^2 - a^2}}{b^2 + c^2} \\ \sin(\omega_{2_{24}}) &= \frac{ac + b\sqrt{b^2 + c^2 - a^2}}{b^2 + c^2} \end{aligned} \quad (31)$$

Pošto postoje dva različita ugla čiji sinusi mogu biti jednaki, mora se proveriti koji od uglova je traženo rešenje. Takođe se mora zadovoljiti uslov da je veličina ispod korena pozitivna.

Algoritam za proračun granica integracije

Algoritam se sastoji iz sledećih koraka:

- 1) Određivanje uglova izlaska i zalaska za horizontalne površine ($-\omega_s$ i ω_s)
- 2) Određivanje ugla izlaska sunca tj. donje granice integracije ($\omega_{1_{24}}$) i
- 3) Određivanje ugla zalaska sunca tj. gornje granice integracije ($\omega_{2_{24}}$).

1) Određivanje uglova $-\omega_s$ i ω_s

Za severnu hemisferu (usvajajući pretpostavku o padu koji se pruža u beskonačnost) važi:

- Ako je ispunjen uslov $\delta + \phi > \pi/2$, sunce nikada ne zalazi i površina je osunčana 24 časa, odnosno $-\omega_s = -\pi$ i $\omega_s = \pi$.
- Ako je ispunjen uslov $\delta - \phi > \pi/2$, sunce nikada ne izlazi i važi $-\omega_s = \omega_s = 0$ tj. $R_{a_{24}} = 0$.

Za južnu hemisferu važi:

- Ako je ispunjen uslov $\delta + \phi < -\pi/2$, sunce nikada ne zalazi i površina je osunčana 24 časa, odnosno $-\omega_s = -\pi$ i $\omega_s = \pi$.
- Ako je ispunjen uslov $\delta - \phi < -\pi/2$, sunce nikada ne izlazi i važi $-\omega_s = \omega_s = 0$ tj. $R_{a_{24}} = 0$.

Sada je potrebno sračunati vrednosti $\cos(\theta_{-\omega_s})$ i $\cos(\theta_{\omega_s})$ koristeći jednačinu (24). Ove vrednosti će biti korišćene u daljim koracima algoritma za testiranje mogućih kandidata za uglove izlaska i zalaska sunca.

2) Postupak za određivanje ugla izlaska sunca $\omega_{1_{24}}$

- Iz jednačine (31) računa se $\sin(\omega_1)$ a zatim i ω_1 . Vrednost $\sin(\omega_1)$ se mora nalaziti u granicama $-1 \leq \sin(\omega_1) \leq 1$
- Iz jednačine (24) računa se $\cos(\theta_{\omega_1})$
- Ako je ispunjen uslov $\cos(\theta_{-\omega_s}) \leq \cos(\theta_{\omega_1}) < 0,001$ onda je $\omega_{1_{24}} = \omega_1$. U suprotnom se računa pomoćna vrednost: $\omega_{1_x} = -\pi - \omega_1$.
- Iz jednačine (24) računa se $\cos(\theta_{\omega_{1_x}})$ i ako je ispunjen uslov $\cos(\theta_{\omega_{1_x}}) > 0,001$ onda je $\omega_{1_{24}} = -\omega_s$. U suprotnom, se ispituje ispunjenost uslova: $\omega_{1_x} \leq -\omega_s$. Ako je ovaj uslov ispunjen onda je $\omega_{1_{24}} = -\omega_s$, a u suprotnom je $\omega_{1_{24}} = \omega_{1_x}$.

3) Postupak za određivanje ugla zalaska sunca

$$\omega_{24}$$

- Iz jednačine (31) računa se $\sin(\omega_2)$ a zatim i ω_2 . Vrednost $\sin(\omega_2)$ se mora nalaziti u granicama $-1 \leq \sin(\omega_2) \leq 1$
- Iz jednačine (24) računa se $\cos(\theta_{\omega_2})$
- Ako je ispunjen uslov $\cos(\theta_{\omega_s}) \leq \cos(\theta_{\omega_2}) < 0,001$ onda je $\omega_{24} = \omega_2$. U suprotnom $\omega_{24} = \pi - \omega_2$.
- Iz jednačine (24) računa se $\cos(\theta_{\omega_x})$
- Ako je ispunjen uslov $\cos(\theta_{\omega_x}) > 0,001$ onda je $\omega_{24} = \omega_s$.
- U suprotnom, ako je ispunjen uslov $\omega_{24} \geq \omega_s$ onda je $\omega_{24} = \omega_s$.
- U suprotnom $\omega_{24} = \omega_x$.

Algoritam za određivanje dodatnih granica integracije

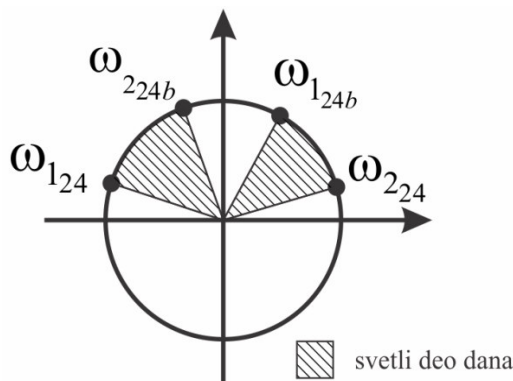
Na nekim strmim površinama mogu se javiti dva perioda dana u toku kojih je površina osunčana, odnosno može se dogoditi da nakon prvog izlaska Sunce zađe ali se pojavi još jednom pre konačnog zalaska. Tada je potrebno odrediti još dve granice integracije: ω_{24b} (ugao prvog zalaska sunca) i ω_{124b} (ugao drugog izlaska sunca). Algoritam je vrlo sličan algoritmu za određivanje primarnih granica integracije. Radi lakšeg razumevanja ovih uglova daje se objašnjenje uglova sa pratećom skicom (Slika 3).

Mogućnost za dva intervala osunčanosti tokom dana postoji ako je ispunjen uslov:

$$\sin(s) > \sin(\phi) \cos(\delta) + \cos(\phi) \sin(\delta). \quad (32)$$

1) Postupak za određivanje prvog ugla zalaska sunca ω_{24b}

- ω_{124} i ω_{24} se računaju kao što je objašnjeno u delu za proračun primarnih granica integracije.



Slika 3. Prikaz uglova izlaska i zalaska sunca: $\omega_{1,24}$ - ugao prvog izlaska sunca, $\omega_{2,24b}$ - ugao prvog zalaska sunca, $\omega_{1,24b}$ - ugao drugog izlaska sunca, $\omega_{2,24}$ - ugao drugog zalaska sunca

- Računaju se $\sin(A) = \frac{ac + b\sqrt{b^2 + c^2 - a^2}}{b^2 + c^2}$ i $\sin(B) = \frac{ac - b\sqrt{b^2 + c^2 - a^2}}{b^2 + c^2}$, gde su a, b i c definisani jednačinom (30). $\sin(A)$ i $\sin(B)$ moraju biti u granicama od -1 do 1.
- Potencijalni kandidat za ω_{24b} se određuje kao $\omega_{24b} = \min(A, B)$.
- Računa se $\cos(\theta_{\omega_{24b}})$ iz jednačine (24).
- Ako je zadovoljen jedan od uslova $\cos(\theta_{\omega_{24b}}) < -0,001$ ili $\cos(\theta_{\omega_{24b}}) > 0,001$, $\omega_{24b} = -\pi - \omega_{24b}$.
- Ako je zadovoljen uslov $\omega_{24b} < \omega_{124}$ onda ne postoje dva perioda osunčanosti i nije potrebno dalje računati.
- U suprotnom izlazni podatak je ω_{24b} .

2) Postupak za određivanje drugog ugla izlaska sunca ω_{124b}

- ω_{124} i ω_{24} se računaju kao što je objašnjeno u delu za proračun primarnih granica integracije.

- Računaju se $\sin(A) = \frac{ac + b\sqrt{b^2 + c^2 - a^2}}{b^2 + c^2}$ i $\sin(B) = \frac{ac - b\sqrt{b^2 + c^2 - a^2}}{b^2 + c^2}$, gde su a, b i c definisani jednačinom (30). $\sin(A)$ i $\sin(B)$ moraju biti u granicama od -1 do 1.
- Potencijalni kandidat za ω_{124b} se određuje kao $\omega_{124b} = \max(A, B)$.
- Računa se $\cos(\theta_{\omega_{124b}})$ iz jednačine (24).
- Ako je zadovoljen jedan od uslova $\cos(\theta_{\omega_{124b}}) < -0,001$ ili $\cos(\theta_{\omega_{124b}}) > 0,001$, $\omega_{124b} = \pi - \omega_{124b}$.
- Ako je zadovoljen uslov $\omega_{124b} > \omega_{224}$ onda ne postoje dva perioda osunčanosti i nije potrebno dalje računati.
- U suprotnom izlazni podatak je ω_{124b} .

Ovim se završava proračun dodatnih granica integracije, međutim i ovako sračunate granice nisu garancija pojave dva perioda osunčanosti u toku dana. Treba postaviti još jedan uslov. Potrebno je integraliti jednačinu (24) u granicama od ω_{124b} do ω_{224b} :

$$\begin{aligned}
 X &= \int_{\omega_{124b}}^{\omega_{224b}} \cos(\theta) d\omega = \\
 &= \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(s) (\omega_{124b} - \omega_{224b}) \\
 &- \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(s) \cos(\gamma) (\omega_{124b} - \omega_{224b}) \\
 &+ \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(s) [\sin(\omega_{124b}) - \sin(\omega_{224b})] \\
 &+ \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(s) \cos(\gamma) [\sin(\omega_{124b}) - \sin(\omega_{224b})] \\
 &- \cos(\delta) \sin(\gamma) \sin(s) [\cos(\omega_{124b}) - \cos(\omega_{224b})]
 \end{aligned} \quad (33)$$

Ukoliko je vrednost integrala manja od nule ($X < 0$) ovo je zaista mračni deo dana i postoje dva perioda osunčanosti i radijacija se računa prema jednačini:

$$R_{a24} = \frac{G_{sc}}{d^2 2\pi} \left[\int_{\omega_{124b}}^{\omega_{224b}} \cos(\theta) d\omega + \int_{\omega_{124b}}^{\omega_{224b}} \cos(\theta) d\omega \right] \quad (34)$$

U suprotnom potrebno je integraliti samo između primarnih granica integracije, prema jednačini:

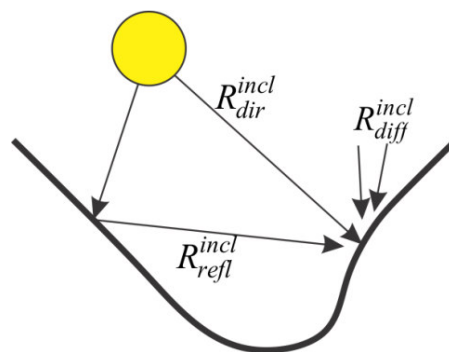
$$R_{a24} = \frac{G_{sc}}{d^2 2\pi} \int_{\omega_{124b}}^{\omega_{224b}} \cos(\theta) d\omega \quad (35)$$

Potencijalna insolacija N se u ovom slučaju računa kao:

$$N = \frac{24}{2\pi} (\omega_{224b} - \omega_{124b} + \omega_{224b} - \omega_{124b}) \quad (36)$$

3.2 Neto radijacija na površinu pod nagibom (R_n^{incl})

Neto radijacija se računa kao razlika neto kratkotalsne (R_{ns}^{incl}) i dugotalasne radijacije (R_{nl}) koja ne zavisi od nagiba površine. U slučaju površine koja je pod nagibom (s) postoje tri komponente solarne radijacije (R_s^{incl}): direktna solarne radijacija (R_{dir}^{incl}), difuzna solarne radijacija usled interakcije sunčevih zraka sa gasovima i aerosolima u atmosferi (R_{diff}^{incl}) i solarne radijacija usled refleksije od ostalih površina (R_{refl}^{incl}). Slika 4 prikazuje sve tri komponente.



Slika 4: Komponente kratkotalsne radijacije na površinu pod nagibom

Solarne radijacija za površinu pod nagibom predstavlja zbir ove tri radijacione komponente:

$$R_s^{incl} = R_{dir}^{incl} + R_{diff}^{incl} + R_{refl}^{incl} \quad (37)$$

Da bi se sračunala radijacija za površinu određenog nagiba i orijentacije najpre je potrebno sračunati komponente za slučaj horizontalne površine a zatim preko koeficijenta direktne radijacije (R_b) u proračun uvesti i nagib i orijentaciju površine.

Postupak za proračun R_{s24}^{hor}

Od ukupne količine radijacije koja stiže na granicu atmosfere deo se potroši na zagrevanje atmosfere, deo se reflektuje od oblaka ili čestica prašine a preostala radijacija koja stiže do površine zemlje predstavlja kratkotalasnu solarnu radijaciju. Odnos kratkotalasne solarne radijacije koja stiže do površine i radijacije na granici atmosfere predstavlja koeficijent transmisivnosti za kratkotalasnu radijaciju (τ_{sw}^{hor}). On je takođe jednak zbiru koeficijenata transmisivnosti za difuzionu komponentu radijacije (K_D^{hor}) i direktnu komponentu (K_B^{hor}) (Allen & Trezza, 2006).

$$\tau_{sw}^{hor} = \frac{R_s^{hor}}{R_a^{hor}} = K_D^{hor} + K_B^{hor} \quad (38)$$

Kratkotalasna solarna radijacija koja stiže do horizontalne površine (R_s^{hor}) može se proceniti prema jednačini (12):

$$\tau_{sw}^{hor} = a_s + b_s \frac{n}{N} \quad (39)$$

gde su $a_s=0.25$ i $b_s=0.5$ empirijske konstante a n/N relativna insolacija (Allen et al., 1998).

Da bi se procenio koeficijent transmisivnosti za difuzionu komponentu radijacije u obzir je potrebno uzeti i oblačnost. Koeficijent transmisivnosti za difuzionu komponentu radijacije i u slučaju horizontalne površine može se sračunati prema jednačini koju su dali Vignola i McDaniels 1986 (Allen & Trezza, 2006), a u zavisnosti od sračunate vrednosti τ_{sw}^{hor} prema jednačini (39):

$$K_D^{hor} = \begin{cases} 0.984\tau_{sw}^{hor} & ; \tau_{sw}^{hor} < 0.175 \\ \begin{pmatrix} -0.022 + \\ +1.28\tau_{sw}^{hor} - \\ -0.828(\tau_{sw}^{hor})^2 - \\ -0.765(\tau_{sw}^{hor})^3 \end{pmatrix} & ; 0.175 \leq \tau_{sw}^{hor} \leq 0.8 \\ 0.08 & ; \tau_{sw}^{hor} > 0.8 \end{cases} \quad (40)$$

Koristeći jednačinu (38), sada se može sračunati i koeficijent transmisivnosti za direktnu komponentu radijacije u slučaju horizontalne površine:

$$K_B^{hor} = \tau_{sw}^{hor} - K_D^{hor} \quad (41)$$

Direktna komponenta radijacije za horizontalnu površinu računa se kao proizvod koeficijenta transmisivnosti za direktnu komponentu i radijacije na granici atmosfere. Analogno se računa i difuziona komponenta. Komponenta refleksije je u ovom slučaju jednaka nuli jer je površina horizontalna.

$$\begin{aligned} R_{dir}^{hor} &= K_B^{hor} R_{a24}^{hor}; R_{diff}^{hor} = K_D^{hor} R_{a24}^{hor}; R_{refl}^{hor} = 0 \\ R_{s24}^{hor} &= R_{dir}^{hor} + R_{diff}^{hor} \end{aligned} \quad (42)$$

Postupak za proračun R_{s24}^{incl}

Ranije je naglašeno da će se preko koeficijenta direktne radijacije (R_b) u proračun uvesti i nagib i orijentacija površine. Nagib i orijentacija površine se uvode indirektno preko radijacije na granici atmosfere (R_{a24}) a postupak proračuna ove radijacije objašnjen je u delu 3.1. Koeficijent direktne radijacije se računa prema sledećoj jednačini (Allen & Trezza, 2006):

$$R_b = \frac{R_{a24}}{R_{a24}^{hor}} \quad (43)$$

pa se direktna komponenta radijacije za površinu pod nagibom se može sračunati kao:

$$R_{dir}^{incl} = R_{dir}^{hor} R_b \quad (44)$$

Difuziona komponenta se računa prema (Allen & Trezza, 2006):

$$\begin{aligned} R_{diff}^{incl} &= R_{diff}^{hor} f_{ia} = \\ &= R_{diff}^{hor} \left[(1 - K_B^{hor}) f_i \left(1 + \sqrt{\frac{R_{diff}^{hor}}{R_{s24}^{hor}}} \sin^3 \left(\frac{s}{2} \right) \right) + R_b K_B^{hor} \right] \end{aligned} \quad (45)$$

gde su f_{ia} - faktor vidljivosti neba za anizotropni model difuzne komponente radijacije; f_i - faktor vidljivosti za izotropni model i računa se prema (Allen et al., 2006):

$$f_i = 0.75 + 0.25 \cos(s) - \frac{0.5s}{\pi} \quad (46)$$

Solarna radijacija usled refleksije odnosno refleksiona komponenta može se sračunati kao:

$$R_{refl}^{incl} = R_{s24}^{hor} \alpha (1 - f_i) \quad (47)$$

Kratkotalasna solarna radijacija na površinu pod nagibom predstavlja zbir ove tri komponente radijacije i računa se prema jednačini (37):

$$R_{s24}^{incl} = R_{dir}^{incl} + R_{diff}^{incl} + R_{refl}^{incl} \quad (48)$$

Neto kratkotalasna radijacija se može sračunati shodno jednačini (11) kao:

$$R_{ns}^{incl} = (1 - \alpha) R_{s24}^{incl} \quad (49)$$

Neto dugotalasna radijacija ne zavisi od nagiba površine i računa prema jednačini (20).

Neto radijacija na površinu pod nagibom (R_n^{incl}) se računa kao razlika neto kratkotalasne i neto dugotalasne radijacije:

$$R_n^{incl} = R_{ns}^{incl} - R_{nl} \quad (50)$$

Referentna evapotranspiracija (ET_0) se dalje računa prema jednačini (1) kako je opisano u delu 2.

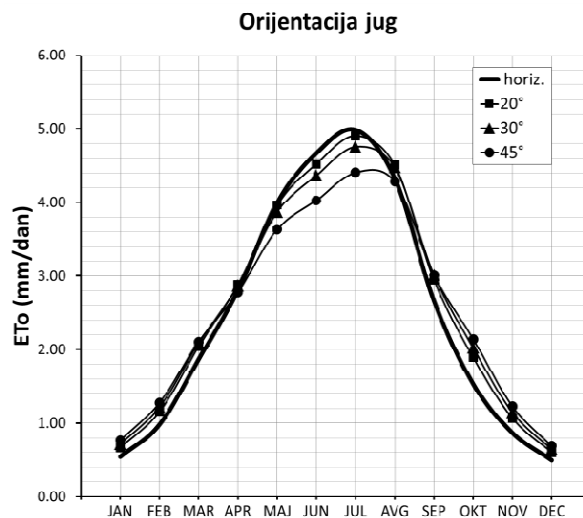
4 TESTIRANJE MODELA

Pri proračunu su korišćeni podaci sa meteorološke stanice Smederevska Palanka. Meteorološka stanica je osnovana 1901. godine. Pozicionirana je na $44^{\circ}22'$ severne geografske širine, $20^{\circ}57'$ istočne geografske dužine i nadmorskoj visini 121 mm. Korišćene su mesečne vrednosti meteoroloških parametara za niz od dvadeset godina (1990 – 2009). Za svaki mesec sračunata je prosečna dnevna referentna evapotranspiracija (ET_0 – mm/dan). Sračunata je referentna evapotranspiracija za horizontalnu površinu a zatim i za površine nagiba 20° , 30° i 45° . Prilikom proračuna razmatrane su severna, južna, istočna i zapadna orijentacija površina.

4.1 Rezultati

Na slici 5 prikazana je promena referentne evapotranspiracije tokom godine za površine različitih nagiba koje su južno orijentisane. Na slici 6 prikazana je takođe promena referentne evapotranspiracije tokom godine za površine različitih nagiba ali za severno orijentisane površine. Na slici 7 prikazana je sumarna godišnja referentna evapotranspiracija za površine različitih nagiba i orijentacija.

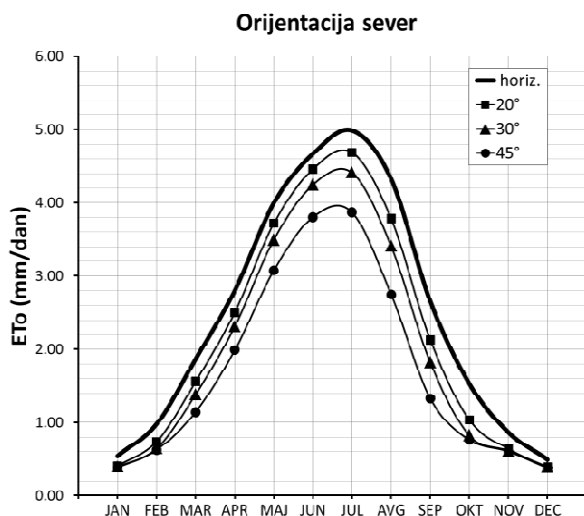
Imajući u vidu da se razmatrana lokacija sa koje su korišćeni meteorološki podaci nalazi na severnoj hemisferi, dobijeni rezultati su u skladu sa očekivanim. Za južno orijentisanu površinu primetno je smanjenje pikova referentne evapotranspiracije u odnosu na horizontalnu površinu. Tako tokom meseca jula prosečna dnevna referentna evapotranspiracija iznosi 4,99 mm za horizontalnu površinu a 4,41 mm za površinu po nagibom 45° . Površina je, međutim, duže izložena solarnoj radijaciji tokom kasnih letnjih i jesenjih meseci što rezultuje povećanjem ukupne godišnje referentne evapotranspiracije (Slika 7). Ovo povećanje referentne evapotranspiracije je najveće za površinu sa nagibom 30° i iznosi 43,66 mm, odnosno 4,81 % u odnosu na horizontalnu površinu. Sa daljim povećanjem nagiba i dalje postoji trend porasta referentne evapotranspiracije ali se on značajno smanjuje.



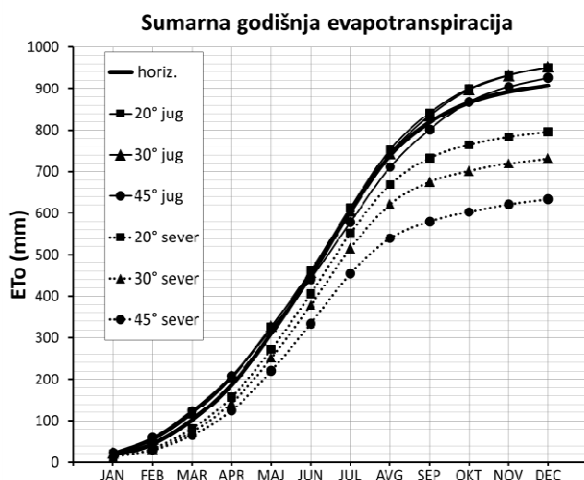
Slika 5: Promena referentne evapotranspiracije tokom godine za površine različitih nagiba i južne orijentacija

Za površinu nagiba 45° sumarna godišnja evapotranspiracija je veća za 18,12 mm odnosno za 2,00 %. Daljim povećanjem nagiba površine, bez obzira što se radi o južnoj orijentaciji, doći će do smanjenja sumarne godišnje referentne evapotranspiracije.

U slučaju severno orijentisane površine primetno je opadanje i pikova referentne evapotranspiracije tokom godine i sumarne godišnje referentne evapotranspiracije. Ovo je i očekivano jer je površina "okrenuta od Sunca". Sa povećanjem nagiba ovaj trend je sve izraženiji.



Slika 6: Promena referentne evapotranspiracije tokom godine za površine različitih nagiba i južne orijentacija



Slika 7: Sumarna godišnja referentna evapotranspiracija za površine različitih nagiba i orijentacija

Ukoliko se porede referentne evapotranspiracije tokom meseca jula za horizontalnu površinu i površinu pod nagibom 45° uočiće se smanjenje sa 4,99 mm/dan na svega 3,87 mm/dan. Razlike u sumarnoj godišnjoj referentnoj evapotranspiraciji su još značajnije. Za horizontalnu površinu sumarna godišnja referentna evapotranspiracija iznosi 907,91 mm. Za površinu severne orijentacije i nagiba 45° ona iznosi 633,50 mm što je smanjenje od 274,41 mm odnosno 30,22 %.

5 ZAKLJUČAK

U radu je opisana standardna Penman – Monteith metoda preporučena za proračun referentne evapotranspiracije od strane FAO. Pretpostavka metode je da se radi o horizontalnoj površini.

Razvijen je metod za proračun radijacije na granici atmosfere u toku 24 časa u zavisnosti od pada i orijentacije površine. Posebna pažnja posvećena je algoritmu za proračun dodatnih granica integracije u slučaju kada postoje dva perioda osunčanosti u toku dana.

Zatim je razvijen i metod za proračun neto radijacije na površini određenog nagiba i orijentacije koji u obzir uzima sve tri komponente radijacije: direktnu, difuzionu i refleksionu. Ovim je omogućena primena osnovne jednačine Penman-Monteith metode za proračun referentne evapotranspiracije i na površine koje nisu horizontalne.

Testiranje modela je sprovedeno koristeći podatke sa meteorološke stanice Smederevska Palanka. Uočeno je da se za severno orijentisanu površinu sa povećanjem nagiba značajno smanjuje i referentna evapotranspiracija. U slučaju južne orijentacije dolazi do povećanja referentne evapotranspiracije na godišnjem nivou uz smanjenje pikova referentne dnevne evapotranspiracije. Analogno, za slučaj lokacije koja se nalazi na južnoj hemisferi povećanje referentne evapotranspiracije bi se dobilo za severno orijentisanu površinu a smanjenje za južno orijentisanu površinu.

6 ZAHVALNOST

Ovaj rad je deo naučnog projekta TR 37010 "Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture" koji se realizuje u okviru Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije od januara 2011. godine. Autori se zahvaljuju Ministarstvu na podršci u razvoju programskog sistema 3DNet u okviru koga je i implementiran prikazani rad.

LITERATURA

- [1] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements*. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- [2] Allen, R.G. & Trezza, R., 2006. *Procedure and calculation steps for solar radiation and reference evapotranspiration (ET₀) on inclined surfaces. Appendix C of Sandia National Laboratories report Simulation of Net Infiltration for Present-Day and Potential Future Climates*. University of Idaho Research and Extension Center.
- [3] Allen, R.G., Trezza, R. & Tasumi, M., 2006. Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes. *Agricultural and Forest Meteorology*, (139), pp.55-73.
- [4] Avakumović, D., 1994. *Navodnjavanje*. Beograd: Građevinski fakultet.
- [5] Avakumović, D. et al., 2005. Savremena analiza potrebnih količina vode za navodnjavanje. *Vodoprivreda*, 1-2.
- [6] Bonacci, O., 2005. Sadašnje stanje i potrebe razvoja hidrologije. *Vodoprivreda*, 37(4-6), pp.163-73.
- [7] Hetrick, W.A., Rich, P.M., Barnes, F.J. & Weiss, S.B., 1993. GIS- based solar radiation flux models. 3, pp.132-43.
- [8] Kumar, L., Skidmore, A.K. & Knowles, E., 1997. Modelling Topographic variation in solar radiation in a GIS environment. 11(5), pp.475-97.
- [9] Webb, C.P., 2010. Bureau of Meteorology Reference Evapotranspiration Calculations.

EFFECTS OF SLOPE AND SURFACE ORIENTATION ON CALCULATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION BASED ON PENMAN-MONTEITH EQUATION

by

Miloš STANIĆ, Željko VASILIC, Dušan PRODANOVIĆ

Faculty of Civil Engineering
University of Belgrade

Summary

Evapotranspiration is an important component of hydrological balance and it is calculated based on reference evapotranspiration (ET₀). In the last fifty years there have been many empirical models developed for determining ET₀. In May 1990 United Nations Food and Agricultural Organisation (FAO) recommended the use of Penman-Monteith method as a standard for this purpose. Method defines ET₀ as a potential evaporation from horizontal reference surface. Orientation and slope of the surface, however, have an impact on the amount of available solar energy and therefore on the value of ET₀. Available energy that is involved in the process of evapotranspiration is called net radiation and it depends, among others, of the amount of extraterrestrial

solar radiation and atmosphere transmissivity. In this paper, we present method for calculation of extraterrestrial solar radiation which takes into account both slope and surface orientation as well as method for calculation of net radiation on the surface considering all three radiation components (direct, diffuse and reflected). Model was tested using data from Smederevska Palanka meteorological station. Results show that increasing slope decreases value of ET₀ for north oriented surfaces and increases for south oriented.

Key words: Reference evapotranspiration, Penman-Monteith, ET₀

Redigovano 26.10.2011.